

# 模型実験による海洋構造物の動的挙動について

川瀬 健夫\*・西村 一人\*

## 1. ま え が き

深海域に建設される大型海洋構造物は動的解析を基礎とした設計が必要とされている。大型海洋構造物の厳密な動的解析による設計は大型電子計算機の多量の使用により高価なものとなる。そのために海面変動から振動応答までの間に適当な仮定を設けたり、あるいは近似化して問題を単純化した解析が要求される。その際、適切な近似化を行う上で対象とする振動現象を明確にとらえておく必要がある。

ここでは不規則波浪に対する海洋構造物の波浪進行方向の動的挙動をとらえるべく模型実験を実施し、更に実験モデルを比較的簡単な解析モデルに置換して線形解析によって応答を求めて実験結果と比較検討したものを報告するものである。

## 2. 実験の概要

### (1) 実験モデル

実験モデルとしてアクリライト製の円柱及び骨組モデルを使用した(図-1)。

円柱モデルにおいては、天端には非接触型変位計用ターゲットを設け、更に造波水路水深 1.6 m の貯水状態を基準とした EL  $\pm 0$  m,  $-0.4$  m,  $-0.8$  m,  $-1.2$  m には曲げモーメント検出用歪ゲージを, EL  $-1.37$  m~EL

$-1.52$  m には波力測定用歪ゲージをそれぞれ取付けた。骨組モデルは円柱モデルと同様に天端に変位計用ターゲットを設けた。その他に EL  $+0.4$  m,  $-0.2$  m,  $-0.8$  m に位置する水平部材に 2G 加速度計を設置した。EL  $-1.25$ ~EL  $-1.4$  m の主脚(4本)に波力測定用歪ゲージを, EL  $-0.6$  m~EL  $-0.8$  m 間と EL  $-1.0$  m~EL  $-1.2$  m 間の斜材に軸力変動測定用歪ゲージをそれぞれ取付けた。実験モデルの固有周期を変化させるために 1 枚約 5 kg の鋼製載荷板を順にのせ、上載荷重が 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 kg の各状態について空中及び水中での自由振動実験と波浪応答実験を行った。

### (2) 自由振動実験

実験モデルの固有周期, 振動モード, 減衰定数等の振動特性値を把握すべく、水中及び空中での自由振動実験を実施した。載荷板を 1 枚ずつ順次設置した円柱及び骨組モデルの天端に初期強制変位(10 mm, 15 mm, 20 mm)を与えて、瞬時開放させることによって自由振動を与えた。各モデルについて天端の振動変位を測定し、更に円柱モデルでは EL  $\pm 0$  m,  $-0.4$  m,  $-0.8$  m,  $-1.2$  m のところの曲げ歪を、骨組モデルでは EL  $+0.4$  m,  $-0.2$  m,  $-0.8$  m のところの加速度を測定した。

### (3) 波浪応答実験

水深 1.6 m とした造波水路に実験モデルを設置して、式(1)で表わされる Bretschneider-光易型の波形スペクトルに従う不規則波浪(造波目標値  $H_s \approx 15$  cm,  $T_s \approx 1.7$  sec)を作用させた。

$$S_{\eta\eta}(f) = 0.43 \left( \frac{\bar{H}}{T_s^2} \right)^2 f^{-5} \exp \{ -0.675 (\bar{T} \cdot f)^{-4} \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $\bar{H} = 0.625 H_s$ ,  $\bar{T} = 0.9 T_s$

上載荷重状態の異なる実験モデルについて水面変動, 波浪進行方向の天端変位, 全水平波力を測定した。骨組モデルについては上記の測定項目に加えて斜材の軸力変動も測定した。全水平波力は造波水路で発生させた不規則波浪の有義波周期( $T_s$ )と実験モデルの固有周期( $T_n$ )とが充分離れていると考えられた天端上に載荷板が存在しない状態での実験モデル底部近傍の歪を測定して求めた。

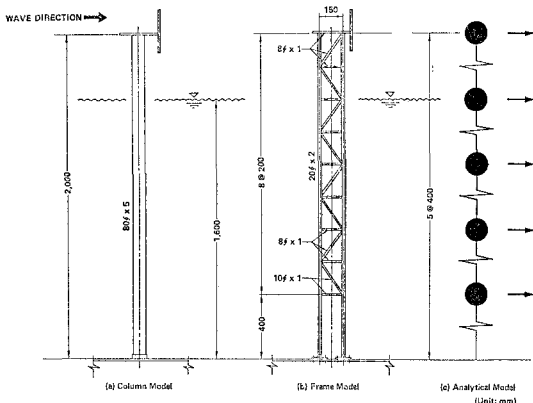


図-1 実験モデルと解析モデル

\* 正会員 新日鉄相模原技術センター

### 3. 実験結果

#### (1) 実験モデルの振動特性値

固有周期は水中及び空中での自由振動実験による天端変位記録から求めた。減衰定数は天端振動変位記録より次式を用いて算定した。

$$\delta = \frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $h$ : 減衰定数,  $\delta$ : 対数減衰率

図-2 は実験モデルの空中での固有周期に対する水中での固有周期増分比と初期強制変位量との関係である。初期強制変位量に対する水中での固有周期の増分はほぼ一定と考えてよい。又水中での固有周期の増分は水没部質量/全質量比が 0.1 以下では認められなかった。図-3 は水中での実験モデルの減衰定数と初期強制変位量との関係である。初期強制変位量の増大に伴って減衰定数の増加が認められた。特に円柱モデルでその傾向が顕著に現れた。

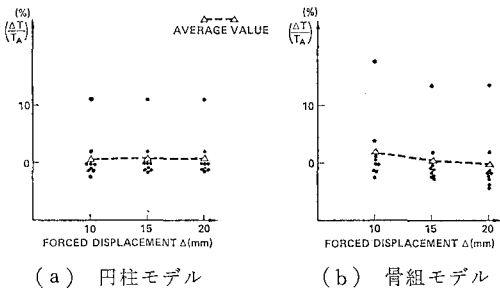


図-2 初期強制変位量と水中での固有周期増分比

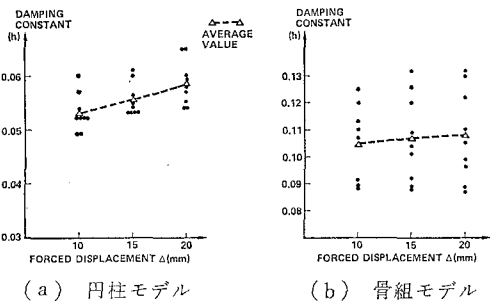


図-3 初期強制変位量と水中での減衰定数

#### (2) 水面変動と波力

図-4 は測定された水面変動と骨組モデルに作用した波力のパワースペクトルとコヒーレンシーである。水面変動と波力のパワースペクトルはよく相似しており、特に水面変動及び波力のパワーが集中する振動数領域において強い線形性が認められた。

不規則波浪の流体力係数(抗力係数, 質量力係数)は測定した波力パワースペクトルと抗力の非線形項を線形

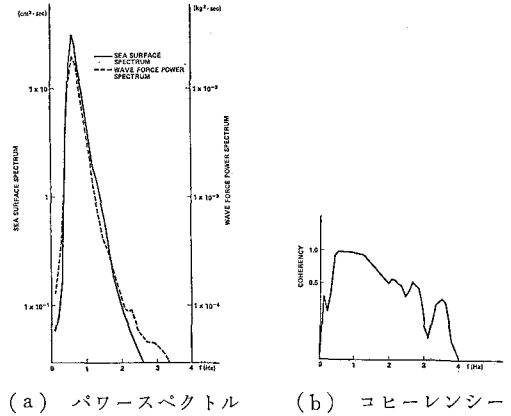


図-4 水面変動と骨組モデルに作用した波力のパワースペクトルとコヒーレンシー

化した Borgman の近似式による理論波力パワースペクトル<sup>1)</sup>(以後これを理論波力パワースペクトルと呼ぶ)との差の自乗が最小になるように求めた。即ち次式の自乗が最小になるように抗力係数 ( $C_D$ ), 質量力係数 ( $C_M$ ) を求めた。

$$E(f) = \left( \frac{S_{FD}(f)}{S_f^*(f)} \right) C_D^2 + \left( \frac{S_{FI}(f)}{S_f^*(f)} \right) C_M^2 - 1 \dots (3)$$

ここで  $E(f)$  : 実測波力パワースペクトルと理論波力パワースペクトルの差を実測波力パワースペクトルで除したものである。

$S_{FD}(f)$  :  $C_D=1, C_M=0$  とした理論波力パワースペクトル

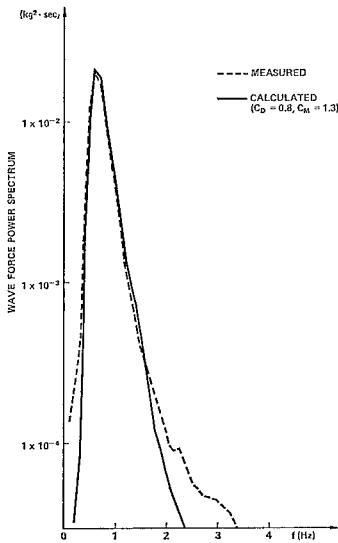
$S_{FI}(f)$  :  $C_D=0, C_M=1$  とした理論波力パワースペクトル

$S_f^*(f)$  : 実測波力パワースペクトル

表-1 不規則波浪の流体力係数

| Model  | $C_D$   | $C_M$ | Reynolds Number                | $D/L$ |
|--------|---------|-------|--------------------------------|-------|
| Column | 0.7~1.3 | 2.3   | $6.73 \sim 6.76 (\times 10^3)$ | 0.017 |
| Frame  | 0.8     | 1.3   | $1.62 \sim 1.68 (\times 10^3)$ | 0.004 |

表-1 は式 (3) により計算された不規則波浪の流体力係数である。表中の  $Re$  数算定上の水粒子速度は理論計算から求まる水面と水面下 20 cm 間の水粒子速度自乗平均平方根を用いた。骨組モデルの部材径 ( $D$ ) としては主脚外径を使用した。又波長 ( $L$ ) は波力のパワーが最大となるところの振動数から求めたものである。図-5 は得られた流体力係数を用いた理論波力パワースペクトルと実測全水平波力パワースペクトルを示したものである。両者はよく相似しており、ここで得られた流体力係数は Borgman の波力式を使用する場合は適当なものと思われた。



図—5 実測及び理論計算による波力パワースペクトル

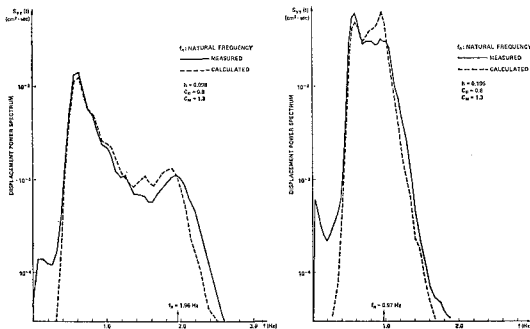
### (3) 応答変位

円柱及び骨組モデルを図—1(c)に示す解析モデルで表わすと質点*i*の応答変位 $y_i$ のパワースペクトルは近似的に次式で表わされる。

$$S_{y_i y_i}(f) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{\varphi_{ri} \varphi_{si} |H_r(f)| \cdot |H_s(f)|}{(2\pi f_r)^2 (2\pi f_s)^2 M_r M_s} S_{Q_r Q_s}(f) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $\varphi_{ri}, \varphi_{si}$  : 質点*i*の*r*次, *s*次の振動振幅  
 $f_r, f_s$  : *r*次, *s*次の固有振動数  
 $H_r(f), H_s(f)$  : *r*次, *s*次の振動数伝達関数  
 $M_r, M_s$  : *r*次, *s*次の一般質量  
 $S_{Q_r Q_s}(f)$  : *r*次と*s*次波力のクロススペクトル

式(4)による実験モデル応答変位パワースペクトル計算に当って、固有周期、減衰定数は水中での自由振動

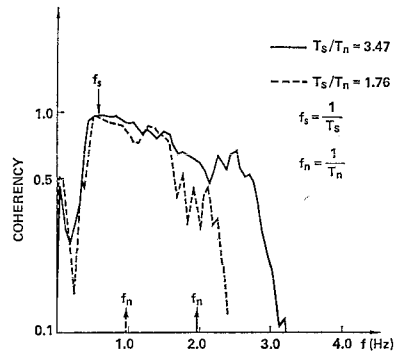


(a) 有義波周期/固有周期 ( $T_s/T_n$ )=3.47      (b) 有義波周期/固有周期 ( $T_s/T_n$ )=1.76

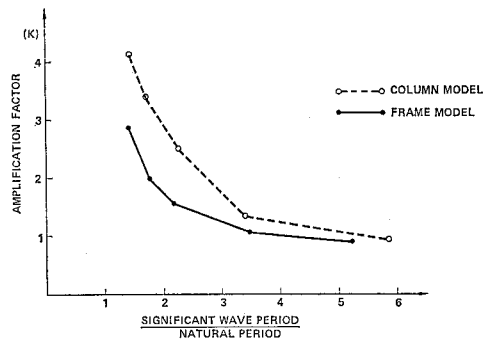
図—6 実測及び理論計算による骨組モデル天端の応答変位パワースペクトル

実験結果を用い、流体力係数は表—1の値を用いた。図—6は不規則波浪の有義波周期( $T_s$ )と固有周期( $T_n$ )との比がそれぞれ1.76, 3.47のときの実測及び理論計算による骨組モデル天端の応答変位パワースペクトルである。

理論計算によるパワースペクトルと実測パワースペクトルはよく一致しているものと思われたが、モデルの固有周期近傍において理論スペクトル値が実測スペクトル値よりわずかに大きくなる傾向が認められた。図—7は水面変動と骨組モデル天端応答変位とのコヒーレンシーである。水面変動のパワーが集中する振動数領域で線形性が強く現れていた。



図—7 水面変動と骨組モデル天端応答変位とのコヒーレンシー



図—8 動的応答倍率

図—8は次式により求めた動的応答倍率を示したものである。

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{\delta_{DS}}{\delta_{static}} \\ \delta_{DS} &= 2\sqrt{\int_0^{\infty} S_{yy}(f) df} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで  $\delta_{DS}$  : 不規則波浪応答により測定された天端変位の1/3最大振幅  
 $\delta_{static}$  : ストークス5次近似で表わした規則波浪に対する理論計算による静的変位  
 $\delta_{static}$  計算上の波高及び周期は不規則波浪の有義波高

及び有義波周期を使用した。図-8において円柱モデルと骨組モデルで動的応答倍率が異なっているのは、水中自由振動実験により得られた減衰定数の相異によるものである。円柱モデルの水中での減衰定数は  $h=0.05\sim 0.06$ 、骨組モデルでは  $h=0.09\sim 0.12$  であった。最大暴風時波浪に対する実設計では減衰定数としていかなる値を用いるかは大きな問題として残るが、図-8に見られるように有義波周期と固有周期比 ( $T_s/T_n$ ) が約5以上になると動的影響は無視できるのではないかとと思われる。

#### (4) 部材力範囲頻度分布

不規則波浪に対する応答中の骨組モデルの斜材軸力頻度分布を図-9に示すような3つの計数法によって求めた。部材力範囲の頻度分布は海洋構造物疲労設計において重要な要素のひとつである。スペクトル法による海洋構造物疲労解析においては、振動応答現象をエルゴデック、ガウシアン確率過程でしかも狭帯域現象として、しばしば部材力範囲分布をレイリー分布として解析している<sup>2)</sup>。

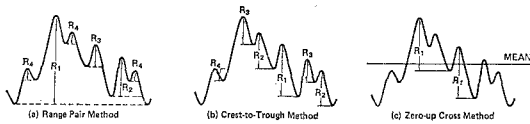


図-9 斜材軸力範囲計数法

今回の3つの計数法によった場合の斜材軸力範囲分布とレイリー分布との関係は  $T_s/T_n$  に関して次のようになる。波浪を zero-up-cross 法で定義すると、その波高分布はスペクトルの形に無関係にレイリー分布で近似できることが確かめられている<sup>3)</sup>。部材力範囲分布についても同様で zero-up-cross 法によると  $T_s/T_n$  に無関係にレイリー分布で近似できる。range pair 法と crest-to-trough 法によった場合は  $T_s/T_n$  に関して同じような傾向を示した。即ち図-10に示すように  $T_s/T_n$  が

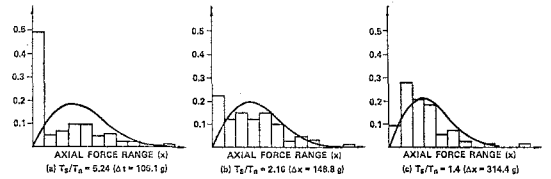


図-10 軸力範囲分布とレイリー分布

大きくなるに従って部材力範囲分布はレイリー分布から逸脱する傾向を示した。疲労亀裂発生の最大の要因は塑性歪の繰返しであることを考えると計数法として range pair 法が最も適当な計数法といわれている<sup>4)</sup>。よって疲労設計時に全ての海象条件に対して部材力範囲分布としてレイリー分布を適用すると低部材力範囲の繰返し数を過少評価する可能性がある。

#### 4. あとがき

深海域海洋構造物設計法確立の一環として、今回不規則波浪による海洋構造物の動的応答特性について模型実験により検討した。しかしながら、この他にも多くの問題点が残されており、今後も現場測定及び模型実験と理論的検討をとおして残された技術課題解明に取り組むつもりである。

#### 参考文献

- 1) Borgman, L. E.: Spectral analysis of ocean wave forces on piling, ASCE, WW2, May 1967.
- 2) Maddox, N. R. and Wildenstein, A. W.: A spectral fatigue analysis for offshore structure, Offshore Technology Conference, OTC 2261, 1975.
- 3) 合田良実・永井康平・伊藤正彦: 名古屋港における波浪観測, 第3報——現地波浪の回折現象ならびに統計的性質について——, 港湾技研資料 No. 120, 1971.
- 4) 日本鋼構造協会: 日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説(案), JSSC, Vol. 10, No. 101, 1974.